

**NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKOG FAKULTETA
UNIVERZITETA U BEOGRADU**

Predmet: Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata Mr Akram Ariebe M. Halap-a, dipl.inž.

Odlukom br. 35/356 od 18. decembra 2014 godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata Mr Akram Ariebe M. Halap-a, dipl.inž., pod naslovom **"Struktura i zavarljivost Al-Mg legura visoke čvrstoće za brodogradnju"**.

Posle pregleda dostavljene Disertacije i drugih pratećih materijala i razgovora sa Kandidatom, Komisija je sačinila sledeći

R E F E R A T

1. UVOD

1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije

23.09.2010. – Kandidat Mr Akram Ariebe M. Halap, dipl.inž., prijavio je temu doktorske disertacije pod nazivom: "Struktura i zavarljivost Al-Mg legura visoke čvrstoće za brodogradnju", a Nastavno naučno veće Tehnološko metalurškog fakulteta u Beogradu usvojilo sastav Komisije za ocenu naučne zasnovanosti predložene teme. *Napomena:* Kandidat je uslov za prijavu teme ispunio, jer je 2003. godine odbranio magistarski rad na Tehnološko metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

07.10.2010 – Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta doneta je Odluka o odobravanju predloga teme doktorske disertacije Mr Akram Ariebe M. Halap-a, dipl.inž., pod nazivom: "Struktura i zavarljivost Al-Mg legura visoke čvrstoće za brodogradnju", a za mentora ove doktorske disertacije imenovan je dr Endre Romhanji, redovni profesor TMF-a.

29.10.2010 – Na sednici Veća naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu, data je saglasnost na predlog teme doktorske disertacije Mr Akram Ariebe M. Halap-a, dipl.inž., pod nazivom "Struktura i zavarljivost Al-Mg legura visoke čvrstoće za brodogradnju".

18.12.2014. – Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta doneta je Odluka o imenovanju članova Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije Mr Akram Ariebe M. Halap-a, dipl.inž., pod nazivom: "Struktura i zavarljivost Al-Mg legura visoke čvrstoće za brodogradnju". Za mentore, odnosno ko-mentore, za ocenu i odbranu ove doktorske disertacije, imenovani su dr Endre Romhanji, redovni profesor TMF-a i dr Miljana Popović, vanredni profesor TMF-a.

1.2. Naučna oblast disertacije

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije pripadaju naučnoj oblasti Metalurgije, za koju je matičan Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu. Na osnovu objavljenih radova u navedenoj naučnoj oblasti Metalurgija i dosadašnjeg iskustva u naučno-istraživačkom radu, konstatujemo da su imenovani članovi Komisije, kompetentni za ocenu i odbranu ove doktorske disertacije.

1.3. Podaci o kandidatu

Akram Ariebe M. Halap rođen je 25.06.1968.god. u mestu Zwara u Libiji. Nakon osnovne i srednje škole diplomirao je na Univerzitetu Al-Fatah, na grupi za Metalurško inženjerstvo, u Libiji. Poslediplomske studije pohađao je na Tehnološko-metalurškom fakultetu u Beogradu u periodu 1997-2000.god. U toku magistarskih studija položio je 10 ispita sa prosečnom ocenom 9.10 i uspešno je odbranio magistarsku tezu.

2. OPIS DISERTACIJE

2.1 Struktura i sadržaj disertacije

Doktorska disertacija Mr Akram Ariebe M. Halap-a, dipl.inž., napisana je na 147 strana, u okviru kojih se nalazi 7 poglavlja, sa ukupno 67 slika, 22 tabele i 113 literaturnih navoda. Doktorska disertacija sadrži: Uvod, Teorijski deo sa literaturnim pregledom dosadašnjih istraživanja, Eksperimentalni deo, Rezultate, Diskusiju, Zaključak, Literaturu, Dodatak (Appendix), kao i izводе na srpskom i engleskom jeziku.

2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U uvodu je objašnjen značaj Al legura u razvoju nove generacije materijala za primenu u brodogradnji, kao i razlozi za izbor Al-Mg legura za tu namenu.

U poglavlju literaturnog pregleda detaljno su razmotrena sva dosadašnja nastojanja vezana za razvoj Al-Mg legura visoke čvrstoće koje su pogodne za primenu u brodogradnji. Posebno su objašnjeni mikrostrukturni aspekti razvoja inter-granularne korozije (IGC), kao i problem kontrole strukture u procesu proizvodnje ove klase legura, koja obezbeđuje korozionu otpornost. Razmotrene su savremene tendencije u pravcu što efikasnijeg zavarivanja ove klase legura, kojima se postiže najniža degradacija osobina zavarenih limova.

U eksperimentalnom delu je dat detaljan opis ispitivanog materijala, korišćenih eksperimentalnih metoda i plana eksperimenta. U eksperimentalnom radu korišćena je probna legura proizvedena u Valjaonici aluminijuma u Sevojnu, koja je isporučena u vidu toplo valjane trake debljine 7.4 mm. U radu je primenjena široka lepeza različitih uslova termomehaničke prerade toplo valjanih traka, i izvršena je karakterizacija strukture materijala. Karakterizacija je obuhvatala merenja električne provodljivosti, radi praćenja precipitacionih procesa, ispitivanja mehaničkih svojstava, metalografska ispitivanja putem optičke mikroskopije, kao i ispitivanja skenirajućom (SEM) i transmisionom (TEM) elektronskom mikroskopijom. Za određivanje korozionih svojstava izvršena su ispitivanja osetljivosti prema intergranularnoj, raslojavajućoj (odnosno eksfolijaciji), i piting koroziji, u skladu sa odgovarajućim standardima ASTM G66 i G67. Za ocenu zavarljivosti ispitivane Al-Mg legure, korišćeni su klasični TIG i MIG, kao i pulsirajući TIG i MIG postupci zavarivanja. U poglavlju rezultata prikazani su svi efekti uticaja režima deformacije hladnim valjanjem i temperature žarenja na pokazatelje provodljivosti i mehaničkih osobina, kao i karakteristična strukturna stanja, pre svega vezana za precipitaciju magnezijumom bogate β -faze, i to u

pogledu količine, morfologije i rasporeda u polikristalnom agregatu. Svi karakteristični uzorci podvrgnuti su ispitivanju korozione otpornosti prema standardima ASTM G66 i G67, koji definišu stepen osetljivosti Al-Mg legura prema intergranularnoj, raslojavajućoj i piting koroziji, i određuju primenljivost ovih legura za brodogradnju. Dobijeni rezultati otkrili su korelaciju hladne deformacije sa karakteristikama morfologije i rasporeda precipitata posle žarenja, koje su se pokazale kao dominantne za razvoj ili suzbijanje osetljivosti prema intergranularnoj koroziji. Rezultati ispitivanja zavarenih spojeva pokazali su da je unos toplote znatno niži kod pulsirajućih postupaka i da je pulsirajući MIG praćen sa najnižom degradacijom osobina.

Diskusija je organizovana tako da praktično objašnjava sve ustanovljene korelacije između režima prerade, mehaničkih i strukturnih karakteristika i korozionog ponašanja ispitivane legure. Posebno je razmotren i objašnjen fenomen uticaja hladne deformacije na karakter izdvojene β -faze u toku završnog žarenja i njen uticaj na korozionu stabilnost. Kako je ustanovljen i kritični stepen hladnog valjanja za precipitaciju β -faze u širokom temperaturnom intervalu završnog žarenja, to je praktično ustanovljen i kritični režim prerade traka za postizanje stanja H321 (ASTM B 928/B 928M-04a), koje definiše primenljivost ovih legura u brodogradnji.

Zavarljivost ispitivane legure je najbolja u postupku MIG-puls, zbog najnižeg unosa energije. Međutim uspeh zavarivanja u velikoj meri zavisi od kvaliteta zaštitnog gasa tj. od uspešnosti suzbijanja poroznosti vara.

U zaključcima je taksativno dat pregled svih važnih konstatacija i objašnjenja u pogledu kontrole strukture Al-Mg legura koja obezbeđuje postizanje visoke čvrstoće i korozione otpornosti, kao i odgovarajućih karakteristika zavarljivosti.

3. OCENA DISERTACIJE

3.1. Savremenost, originalnost i značaj

Tema ove disertacije proistekla je iz zahteva industrije za proizvodnju i preradu Al-legura (Valjaonica Aluminijuma Impol-Seval u Sevoju), kao rezultat veoma značajnih razvojnih aktivnosti u svetu, koje su vezane za unapređenje primene aluminijuma u transportnim sredstvima radi uštede energije, smanjenja potrošnje goriva i povećanja nosivosti korisnog tereta.

3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

U doktorskoj disertaciji je citirano ukupno 113 referenci. U toku izrade doktorske disertacije, kandidat je koristio literaturu koja je referentna i savremena. Takođe, po tematici, literatura je bila veoma širokog spektra, pokrivajući različite aspekte koji utiču na razvoj mikrostrukture u procesu proizvodnje, ponašanje u korozionoj sredini, zavarljivost itd. Korišćenje novije literature omogućilo je da se usvoje savremena tumačenja pojedinih pojava i procesa objašnjenih u disertaciji.

3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

Svi eksperimenti su rađeni nakon pažljivog izbora opreme, ocene sigurnosti rezultata i korisnosti za sveobuhvatno sagledavanje predmeta rada. Primenjene metode su omogućile konsekvantno vođenje svake etape eksperimentalnog rada jer su se rezultati nadograđivali i mogli su se koristiti za dizajniranje svake nove etape rada.

3.4. Primenljivost ostvarenih rezultata

Dobijeni rezultati su primenljivi direktno u industriji, jer definišu sve potrebne parametre termo-mehaničke prerade Al-Mg legura visoke čvrstoće, koji obezbeđuju postizanje stanja H321, odnosno postizanje zahtevanog nivoa čvrstoće, kao i otpornost prema inter-granularnoj koroziji, koje je definisano u standardu ASTM B 928/B 928M – 04a.

3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

Kandidat Mr Akram Ariebe M. Halap, dipl.inž. je tokom izrade doktorske disertacije pokazao veliku stručnost i sposobnost u pripremi i realizaciji planiranih eksperimenata, korišćenju različitih tehnika karakterizacije materijala, ispitivanja korozionog ponašanja i zavarljivosti, kao i pri analizi dobijenih rezultata. Tokom izrade ove doktorske disertacije kandidat je ispoljio neophodne sposobnosti za samostalni naučno-istraživački rad.

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

U okviru ove doktorske disertacije ostvaren je značajan doprinos u razumevanju i uspostavljanju korelacije između parametara termomehaničke prerade i korozionog ponašanja, odnosno zavarljivosti ispitivane Al-Mg legure sa povećanim sadržajem Mg. Najznačajniji naučni doprinosi ove disertacije su:

- Definisani su uslovi termomehaničke prerade za dobijanje koroziono otpornog stanja H321 sa definisanim vrednostima mehaničkih svojstava za primenu u brodogradnji;
- Utvrđena je korelacija između parametara termomehaničke prerade i razvoja mikrostrukture u različitim fazama procesiranja;
- Dobijeni rezultati omogućili su da se uspostavi jasna korelacija između mikrostrukture i mehaničkih, odnosno korozionih svojstava ispitivane legure;
- Utvrđeno je da stepen hladne deformacije utiče na razvoj dislokacione substrukture, odnosno na kinetiku i mehanizam izdvajanja β (Al_3Mg_2) faze, a samim tim i na osetljivost prema intergranularnoj koroziji (IGC);
- Utvrđeno je da je osetljivost prema intergranularnoj koroziji (IGC) kontrolisana morfologijom i distribucijom β (Al_3Mg_2) faze po granicama zrna, a da je udeo precipitata od sekundarnog značaja;
- Definisani su parametri zavarivanja koji obezbeđuju najmanju degradaciju čvrstoće posle primenjenog postupka zavarivanja.

4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije koncipirana su nakon detaljne analize literaturnih podataka i rezultata prethodnih istraživanja, koja se odnose na mogućnost poboljšanja mehaničkih i korozionih svojstava Al-Mg legura sa povećanim sadržajem Mg, za primenu u brodogradnji. Imajući u vidu da je zavarivanje dominantan način spajanja u brodskim konstrukcijama, jedan deo istraživanja bio je posvećen proučavanju zavarljivosti ispitivane Al-Mg legure, kao i ispitivanju razvoja mikrostrukture i mehaničkih svojstava posle primene različitih postupaka zavarivanja.

Aluminijum-magnezijum legure iz serije 5xxx, u kojima je koncentracija Mg atoma preko 3.5%, postaju osetljive prema koroziji. Razvoj korozione osetljivosti vezan je za senzitivizaciju – precipitaciju Mg-a iz presičenog čvrstog rastvora u vidu anodne β (Al_3Mg_2) faze po granicama zrna na temperaturama 60-200 °C.

Osetljivost Al-Mg legura prema koroziji zavisi od sredine, hemijskog sastava legure i načina prerade, tj. primenjenog režima termo-mehaničke prerade. U ovom radu je ispitivan uticaj parametara termo-mehaničke prerade na koroziona i mehanička svojstva, kao i na zavarljivost Zn-om modifikovane legure tipa Al-5.1 wt% Mg-0.7 wt% Mn.

Da bi se razvio optimalan termo-mehanički režim prerade ispitivane legure, radi obezbeđenja mehaničkih i korozionih karakteristika koje zahteva specifično stanje H321 za primenu u brodogradnji, definisana je multiparameterska prerada ispitivanog materijala. Materijal je podvrgnut različitim stepenima hladne deformacije valjanjem (16-55 %), međufaznom žarenju na 350 °C, i završnom žarenju na različitim temperaturama u opsegu 220-280 °C u vremenu 1-3 h. Karakterizacija mehaničkih osobina (tvrdoća i zatezne osobine), korozione karakteristike (osetljivost na intergranularnu koroziju - IGC, eksfolijaciju i piting koroziju) i njihovu korelaciju sa mikrostrukturom (otkrivenu optičkom, skenirajućom i transmisijom elektronskom mikroskopijom) vršena je u različitim fazama procesiranja.

Dobijeni rezultati pokazali su da postoji spregnuti uticaj temperature završnog žarenja i prethodne hladne deformacije na osetljivost prema intergranularnoj koroziji (IGC), koja je određena putem NAML testa (ASTM standard G67). Povećanje temperature završnog žarenja u ispitivanoj temperaturnoj oblasti 220-280 °C, kao i povećanje prethodnog stepena hladne deformacije, praćeno je povećanjem otpornosti na IGC. Tako, uzorak žaren na 220 °C bio je osetljiv na IGC nezavisno od prethodne deformacije (iako osetljivost ka IGC opada sa deformacijom). Posle žarenja na 240 °C i prethodne deformacije od 30 %, uzorak je bio otporan na IGC. Stepenn deformacije praktično nije imao uticaj u slučaju kada je završno žarenje izvršeno na 260 °C i na višoj temperaturi. Uticaj vremena žarenja je bio manje izražen, ali je konsekvntno doprinosio poboljšanju korozione stabilnosti ispitivane legure.

Test ispitivanja sklonosti ka eksfolijaciji i piting koroziji (ASTM G66) pokazao je nedozvoljeni nivo eksfolijacije kod uzoraka koji su deformisani do visokih stepena deformacije (~50 %) i završno žareni na 220 °C. Međutim, sa daljim povišenjem temperature, eksfolijacija se nije javljala, s tim što je i opšta osetljivost prema intergranularnoj koroziji (IGC) suzbijena. Piting korozija nije otkrivena na nezadovoljavajućem nivou (prema standardu ASTM G66), ali je izvesna piting korozija zapažena kod uzoraka žarenih na visokim temperaturama, u stanju koje je pokazalo visoku otpornost prema IGC.

Korelacija mehaničkih osobina (granica tečenja, zatezna čvrstoća, izduženje) i korozione osetljivosti ispitivane legure pokazala je da za dobijanje H321 stanja, režim TMP treba da se bazira na završnoj deformaciji 35-40 % i završnom žarenju na 240 °C/2h. Dalja ispitivanja pokazala su da je posle senzitivizacije na 100 °C/7 dana, legura bila otporna prema IGC, što je od posebnog praktičnog značaja, ako se uzme u obzir da se navedeni uslovi senzitivizacije smatraju ekvivalentom senzitivizacije u radnom veku brodova.

Mikrostrukturna ispitivanja su pokazala da je osetljivost na IGC kontrolisana pre svega morfologijom i distribucijom precipitata po granicama zrna, dok je sam udeo precipitata od sekundarnog značaja. Ispitivanja kod uzoraka žarenih na 240 °C /2h pokazala su da dodatno legiranje sa 0.5 % Zn-a rezultuje precipitacijom trojne faze Al-Mg-Zn i manje količine Cu po granicama zrna. Stepenn hladne deformacije nije uticao na sastav izdvojenih faza, ali je kreiranjem različite dislokacione substrukture uticao na kinetiku i mehanizam precipitacije. Izdvajanje kontinuiranog filma po granicama zrna bio je znak osetljivosti

strukture na IGC. Uzorci koji su deformisani sa višim stepenima deformacije (30-40 %) pokazali su odličnu korozionu otpornost, i u njihovoj strukturi precipitati su bili u diskretnoj formi po granicama zrna, a takođe su bili zapaženi po unutrašnjosti kristalnih zrna.

Ocena zavarljivosti je obavljena na uzorcima sa stepenom deformacije od 42 % žarenim na 240 °C/2h (stanje H321 i H116). Eksperimentalno zavarivanje je obavljeno elektrolučnim postupcima u atmosferi zaštitnog inertnog gasa, i to sa netopivom (TIG postupak) ili topivom elektrodom (MIG postupak), i istim postupcima primenom pulsirajućeg luka (TIG-P i MIG-P postupak). Pokazano je da je unos toplote znatno niži kod pulsirajućih postupaka zavarivanja, i da je pulsirajući MIG praćen najnižom degradacijom osobina.

4.3. Verifikacija rezultata u časopisima i saopštenjima na konferencijama

Rezultati prikazani u doktorskoj disertaciji "Struktura i zavarljivost Al-Mg legura visoke čvrstoće za brodogradnju", koju je uradio kandidat Mr Akram Ariebe M. Halap, dipl.inž. omogućili su sledeće međunarodne publikacije:

1. Međunarodni časopisi:

1.1 Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu (M21)

1. A. Halap, T. Radetić, M. Popović, E. Romhanji, "Influence of the Thermo-Mechanical Treatment on the Intergranular Corrosion Susceptibility of Zn modified Al-5.1 Wt Pct Mg-0.7 Wt Pct Mn Alloy Sheet", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 45A (2014) 4572-4579; ISSN 1073-5623; IF=1.73 (2013: 10/75);

1.2. Rad u međunarodnom časopisu (M23)

1. A. Halap, M. Popović, T. Radetić, V. Vaščić, E. Romhanji, "Influence of Thermo-Mechanical Treatment on the Exfoliation and Pitting Corrosion of an AA5083 Type Alloy", *Materiali in Tehnologije / Materials and Technology*, No4, 48 (2014) 479-483; ISSN 1580-2949, IF = 0.555 (2013: 206/251);

2. Saopštenje na međunarodnom skupu štampano u celini (M33)

1. A. Halap, T. Radetić, M. Popović, E. Romhanji, "Study of homogenization treatments of cast 5xxx series Al-Mg-Mn alloy modified with Zn", *Light Metals 2012*, TMS Annual Meeting, Ed. by: Carlos E. Suarez, TMS, (2012), 387-392; ISSN 0147-0809; ISBN: 978-111829139-9 (DOI: 10.1002 / 9781118359259.ch65).

2. A. Halap, M. Popović, V. Vaščić, T. Radetić, E. Romhanji, "Exfoliation and Pitting Corrosion Susceptibility in a Modified 5083 Type Aluminium Alloy", *Proceedings of 1st MME SEE: Metallurgical & Materials Engineering Congress of South – East Europe*, Ed. by E. Romhanji, M.T. Jovanović, N. Radović, Belgrade, May 23-25, (2013) 194-201; ISBN 987-86-87183-24-7;

3. T. Radetić, A. Halap, M. Popović, E. Romhanji, "Effect of the thermo-mechanical treatment on IGC susceptibility of AA 5083 alloy" *Light Metals 2014 - TMS Annual Meeting*, Ed. by J. Granfield, J. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, (2014) 297-302; ISSN 0147-0809 (); ISBN: 978-111888908-4;

5. ZAKLJUČAK

Kratak osvrt na disertaciju u celini

Na osnovu svega napred iznetog, Komisija smatra da je doktorska disertacija Mr Akram Ariebe M. Halap-a, dipl.inž., pod nazivom: "Struktura i zavarljivost Al-Mg legura visoke čvrstoće za brodogradnju", ispunila ciljeve istraživanja i da predstavlja značajan i originalni naučni doprinos u oblasti Metalurgije, što je potvrđeno objavljivanjem radova u časopisima međunarodnog značaja i saopštenjima na međunarodnim konferencijama, štampanim u celini.

Predlog Komisije Nastavno-naučnom veću

Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću TMF-a da prihvati ovaj REFERAT, i da ga zajedno sa podnetom disertacijom kandidata Mr Akram Ariebe M. Halap-a, dipl. inž., dostavi na uvid javnosti u zakonski predviđenom roku, i uputi na konačno usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu, te da nakon završetka ove procedure, pozove kandidata na usmenu odbranu disertacije, pred Komisijom u istom sastavu.

U Beogradu, 29.12.2014.

ČLANOVI KOMISIJE:

.....
Dr Endre Romhanji, redovni profesor
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

.....
Dr Miljana Popović, vanredni profesor
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

.....
Dr Vencislav Grabulov, naučni savetnik
Institut za ispitivanje materijala Srbije, Beograd

.....
Dr Tamara Radetić, naučni savetnik
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet